



Achard R.
PRAM / Cirad
Martinique,

Cabidoche Y.M.
INRA-APC
Guadeloupe,

Caron A.
PRAM / Cirad
Martinique,

Charlier de Chily A.
PRAM/IRD
Martinique,

Lesueur - Jannoyer M.
PRAM / Cirad
Martinique.

Variabilité de la teneur des sols en chlordécone : conséquences pour l'échantillonnage et étude de la contamination des plantes ...

La chlordécone est un insecticide organochloré qui a été utilisé sur bananeraies jusqu'en 1993 aux Antilles françaises. Malgré l'ancienneté de ces apports, la forte stabilité de la molécule et sa capacité à être retenue par la matière organique des sols font qu'aujourd'hui ces derniers sont encore pollués par la chlordécone et contaminent les eaux qui les traversent [1], ainsi que les plantes, notamment les tubercules, cultivées sur ces parcelles [2].

En préalable à l'évaluation des niveaux de pollution des sols par les organochlorés en Martinique [3], il est apparu nécessaire de préciser les niveaux de risques liés à l'historique cultural et au contexte agro-climatique [4], et de déterminer une méthodologie de prélèvement précise [5]. Il en est de même pour les études des transferts de cette molécule des sols vers les ressources en eaux et vers les tubercules, études pour lesquelles des méthodes ont été adaptées. L'objet de cet article est d'aborder les questions relatives à l'évaluation de la pollution à l'échelle de la parcelle et ses conséquences à d'autres échelles : tant à une échelle localisée (relation de proximité entre la concentration dans la solution du sol et le transfert vers la plante), qu'à l'échelle du bassin de production et/ou du bassin versant.

PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA CONTAMINATION À L'ÉCHELLE INTRA-PARCELLE

La chlordécone a été épandue sous une forme solide (poudre, car la molécule est très faiblement soluble). Les épandages étaient localisés au pied des bananiers et répétés dans le temps (1 épandage tous les 12 à 18 mois selon l'infestation). Ces pratiques, couplées aux propriétés de la molécule ont comme résultat une pollution dont la variabilité spatiale est forte et structurée, cette variabilité est encore observable de nos jours en l'absence de labours. Pour une utilisation plus intensive et plus longue des parcelles, l'emplacement des bananiers a évolué : les rejetons se sont propagés selon la ligne de plantation, et/ou la bananeraie a été labourée et replantée, avec très peu de chances que les nouveaux pieds se retrouvent aux

mêmes positions que les anciens. La variabilité spatiale peut ainsi s'estomper.

Les labours redistribuent la chlordécone de manière complexe. Cette redistribution de la molécule dans l'espace est difficile à analyser a posteriori (création par des labours dressés d'une alternance de bandes de sol contaminées et indemnes, enfouissement de la terre contaminée par labour retourné, interférence de la profondeur de labour avec le modelé). Bien que les stocks résultants sur la totalité des profils de sol soient alors les mêmes, les teneurs mesurées sur la couche superficielle 0-30 cm et leur variabilité spatiale sont alors affectées.

L'ancienneté des apports pourrait enfin laisser soupçonner des migrations de la molécule liées à la circulation des eaux et dont résulteraient des gradients de pollution en relation avec leur topographie.

L'inévitable variabilité spatiale des teneurs du sol en chlordécone à l'échelle de la parcelle nécessite donc des mises au point de méthodes pour l'évaluation de la pollution, ainsi que pour l'étude des mécanismes de dispersion de cette molécule dans l'environnement.

Nous nous sommes d'abord intéressés aux conséquences de la variabilité spatiale de la répartition de la chlordécone dans le sol sur la précision de la détermination de la teneur moyenne d'un horizon sur une parcelle. Les conséquences de cette variabilité pour la contamination des cultures sont décrites par la suite. Enfin, sur la base des observations réalisées, une réflexion est menée sur deux aspects :

- l'évaluation des contaminations des productions agricoles ;
- les méthodes d'étude des mécanismes de dispersion de la chlordécone.

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE INTRA-PARCELLAIRE DES TENEURS DU SOL EN CHLORDÉCONE

Concernant l'étude de la variabilité spatiale de la teneur du sol en chlordécone, le premier objectif consiste à établir un protocole de prélèvement à la parcelle avec un niveau de précision suffisant pour l'obtention de valeurs fiables et représentatives des niveaux moyens de pollution des sols.

Cette démarche nécessite la réalisation d'un

nombre important d'analyses ponctuelles au sein de chaque parcelle.

Ainsi seules deux parcelles, plantées de façon continue en bananiers depuis l'époque chlordécone, ont été étudiées :

- une parcelle traitée sur un temps relativement court (entre 1972 et 1975), en pente légère, représentative de parcelles peu polluées (site 1),
- une parcelle longuement traitée (jusqu'en 1993), peu pentue et représentative des parcelles fortement polluées (site 2).

Sur chaque parcelle, pour caractériser la variabilité à l'échelle décimétrique, plus de trente carottes de 5 cm de diamètre ont été prélevées dans la couche superficielle (0-30 cm), selon un maillage carré de 17 m de côté. Pour caractériser la variabilité à l'échelle métrique à proximité de points de ce maillage, des carottages complémentaires ont été effectués à une distance de 1 à 4 m.

Les teneurs observées sur les prélèvements ponctuels montrent (cf. tableau 1) : une forte pollution sur le site 2 et une faible pollution sur le site 1, en cohérence avec les historiques d'apport. Dans les deux cas, pratiquement tous les points de prélèvements révèlent une teneur supérieure à la limite de quantification (0,02 mg kg⁻¹ de sol sec) et de fortes variations pour les teneurs obtenues (écart type de 60 % de la moyenne pour le site 1 et 30 % pour le site 2).

A l'échelle décimétrique, la forte variabilité des teneurs du sol en chlordécone est confirmée. Aucune organisation spatiale particulière n'est observée sur les parcelles, on ne relève notamment aucun effet lié à la pente (sur le site 1).

A l'échelle métrique, comme cela était supposé du fait du mode hétérogène d'apport de la molécule et de la forte adsorption de la molécule sur le sol, la variabilité locale est très forte (coefficient de variation de 30 et 40 % entre des points situés de 1 à 4 m).

Statistiquement, les distributions des teneurs du sol pour des points distants plus de 15 m suivent une loi normale.

Ainsi, en conservant l'hypothèse de l'absence de gradient de pollution sur les parcelles, il est possible de calculer la précision de détermination de la teneur moyenne du sol d'une parcelle selon le nombre de points d'échantillonnage.

Ces calculs mettent en évidence, pour ces deux parcelles, la faible précision en-dessous d'un échantillonnage sur 20 points (moins de 20 % de précision, cf. tableau 2).

Ceci provient de la forte variabilité spatiale des situations étudiées, à relier à la durée d'apport et/ou à l'incidence de travaux du sol profonds et répétés.

Pour des situations plus ordinaires, un tel échantillonnage peut être considéré comme un majorant assurant une sécurité dans l'estimation de la pollution moyenne d'une parcelle.

Tableau 1. Moyenne de teneur en chlordécone des prélèvements de la couche 0-30 cm réalisés selon un maillage de 17 m

	Chlordécone %>seuil de quantification*	Moyenne des teneurs en chlordécone des (mg/kg de sol)	Ecart type teneurs en chlordécone (mg/kg de sol)
Site 1 (n=31)	97% positifs	0,51	0,33
Site 2 (n=36)	100% positifs	10,12	3,38

* Limite de quantification 0,02 mg/kg

Tableau 2. Résumé du nombre de carottes nécessaires selon la précision souhaitée pour la détermination de la contamination moyenne du sol d'une parcelle pour l'horizon 0-30 cm

Précision souhaitée	30%	20%	16%	15%	13%
Nombre de carottes	8-10	16-20	20-25	25-29	30-36

Source Achard et al, BRGM-CIRAD 2003.



EFFET DE LA POSITION TOPOGRAPHIQUE SUR LA RÉPARTITION SPATIALE INTRA-PARCELLE DE LA CHLORDÉCONE

Il est cependant important de valider l'absence de gradient, notamment sous l'influence de la topographie (facteur pente), pour la mise en œuvre des plans d'échantillonnage proposés précédemment.

La chlordécone a été appliquée de façon régulière sur les parcelles, mais des transferts ont pu intervenir au sein de la parcelle selon deux modes :

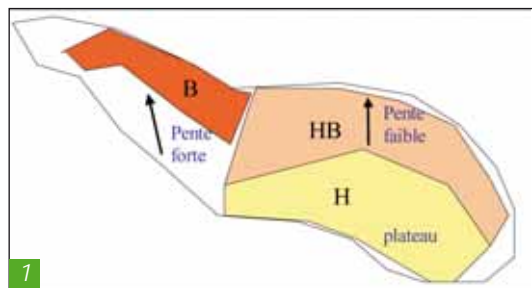
- par voie solide (déplacement des particules de produit appliqué et/ou de particules de sol pollué), sous l'effet de l'érosion sur les pentes,
- en solution, sous l'influence de flux hydriques latéraux hypodermiques.

Ces transferts auraient pour conséquence l'existence de gradients de pollution du sol, du haut vers le bas, avec une accumulation vers les zones basses de la parcelle.

Nous avons donc recherché l'existence de ce gradient lié à la topographie sur une parcelle ayant reçu un faible nombre d'apports de chlordécone.

La parcelle comporte une partie haute constituée d'un plateau, et deux parties plus basses, l'une directement en aval du plateau, présentant une faible pente (15 %), et une deuxième partie basse, d'une pente plus forte (25 %).

Trois échantillons composites ont été constitués, sur la base du prélèvement de 25 points disposés selon une maille de 10 x 20 m, et expédiés pour analyse de leur teneur en chlordécone.



L'analyse des échantillons composites révèle très peu de différences entre les trois zones topographiques à l'intérieur de la parcelle (teneur [0-30cm]) :

- zone H-plateau = 0,180 mg/kg,
- zone HB-pente faible = 0,120 mg/kg,
- zone B-bas = 0,160 mg/kg.

La teneur du sol la plus élevée correspond à la position topographique de la zone haute de la parcelle (zone H), la zone basse présentant une teneur un peu plus faible. La teneur légèrement moins élevée en zone de faible pente (HB), aurait pu avoir pour origine un départ de terre superficiel par érosion, mais en l'absence d'accumulation dans les parties basses (B), cette hypothèse ne peut être validée.

La variation d'environ 20 % des teneurs du sol constatée entre les trois sous-parcelles peut s'expliquer par l'effet de l'échantillonnage, puisqu'une variabilité du même ordre de grandeur est attendue entre plusieurs échantillons composites issus d'un prélèvement sur 20 points (cf. tableau précédent).

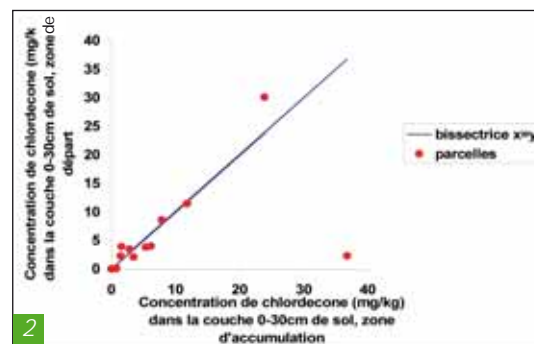
En conclusion, la différence de position topographique n'induit pas de modifications sensibles de la teneur du sol en chlordécone.

L'absence de différence liée à la topographie, est donc à interpréter avant tout comme l'absence de redistribution latérale de la pollution via des écoulements hydriques dans l'horizon de surface pollué.

La comparaison des teneurs du sol en haut et en bas de parcelles en Guadeloupe confirme le peu d'effet de la position topographique, sauf dans les cas de fortes pentes et de travail manuel, où les parties hautes peuvent connaître un décapage progressif sous l'effet des gestes de travail toujours descendants (Figure 2, [6]).

Figure 1 : dispositif de prélèvement pour l'étude de l'effet de la position topographique.

Figure 2 : comparaison des teneurs en chlordécone des couches 0-30 cm des zones de départ (haut) et d'accumulation (bas) dans les parcelles en pente sur andosols (Guadeloupe) (échantillon composite de 6 prélèvements par position, bananeraies pérennes).



VARIABILITÉ DE LA CONTAMINATION RELATIVE DES PLANTES ET DES SOLS À PROXIMITÉ

Pour déterminer l'incidence de la variabilité de la teneur sol au sein de la parcelle sur la contamination des plantes, une étude de la variabilité de la réponse-plante en relation avec la teneur du sol, a été réalisée sur quatre parcelles sur andosols cultivées en dachine (*Colocasia esculenta*, tubercule de consommation courante en Martinique). Sur chaque parcelle étudiée, cinq couples d'échantillons de sol et de plante ont été constitués par la collecte de cinq plantes et du sol à leur pied (horizon 0-30 cm,) et répartis aléatoirement sur la surface de la parcelle (chaque point de prélèvement était indépendant des autres, et distant d'au moins 10 m).

Les échantillons pour analyse sont ensuite réalisés par homogénéisation du sol par mélange, et par prélèvement d'une aliquote représentative sur les tubercules après lavage (suppression des traces de terre). Les teneurs en chlordécone du sol et des plantes ont été déterminées au laboratoire après extraction par chromatographie en phase gazeuse.

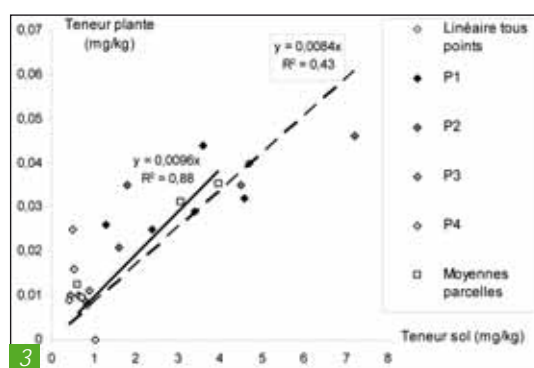


Figure 3 : teneur en chlordécone du sol et des tubercules sur plusieurs échantillons composites collectés sur des parcelles cultivées en dachine.

Figure 4 : relation entre la contamination de navets et celle d'un sol ferrallitique au contact.

NB : P1, P2, P3, P4 : parcelles où ont été prélevés les échantillons composites.
Moyenne P : valeur moyenne de chacune des parcelles.

Les résultats (figure 3) montrent la forte variabilité des teneurs sol des échantillons composites : le coefficient de variation se situe entre 25 et 40 %. Ce résultat confirme l'existence d'une forte variabilité spatiale de la teneur en polluant du sol (P1 et P2).

La variabilité intra-parcelle de la réponse-plante observée est faible sur la parcelle P3, alors qu'elle est très élevée sur la parcelle P4. Pour ces deux parcelles, la différence de comportement

n'est pas liée au niveau de pollution du sol, mais bien à la réponse apparente de la plante.

Globalement, sur ces quatre parcelles, la réponse de la plante apparaît proportionnelle à la teneur du sol, même si cette relation est de qualité médiocre ($R^2 = 0,43$ en imposant un passage par l'origine). Les teneurs moyennes des 20 points de prélèvement par parcelle montrent une proportionnalité entre les teneurs des tubercules et celles des sols ($R^2 = 0,88$).

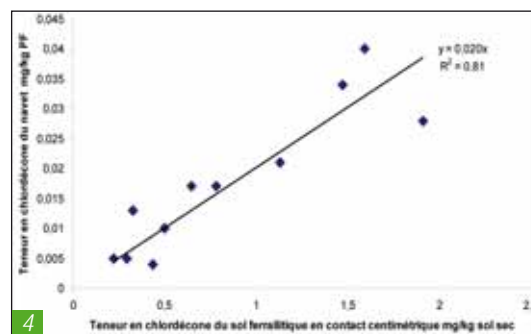
Sur ce faible nombre de cas, la forte dispersion de la réponse des plantes ne semble pas s'opposer à une réponse moyenne de type linéaire. La dispersion de la réponse apparente sur des échantillons de faible effectif reflète donc la forte dispersion des réponses apparentes au sein d'une parcelle, ce qui avait déjà été observé lors d'analyses réalisées individuellement [2].

Finalement, cette dispersion apparaît liée aux variations locales de teneur du sol en polluant, mais aussi à une variabilité de la réponse de la plante, sous l'effet de plusieurs mécanismes possibles :

- le statut hydrique au cours du cycle et à proximité des plantes,
- l'impact de la répartition de la pollution à l'échelle locale (échelle centimétrique),
- le statut organique à proximité de la plante.

Toutefois, lorsque l'on circonscrit les prélèvements de sol contaminant au premier centimètre de sol au contact d'un légume racine récolté, la relation de contamination significative est bien proportionnelle, pour chaque individu récolté et son sol encaissant, comme l'indique la figure 4, relative à une culture de navet sur sol ferrallitique [6].

La relation entre contamination des "racines"





RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] IFEN, *Les pesticides dans les eaux. Données 2003 et 2004.*

http://www.ifen.fr/publications/dossiers/PDF/dossier_05.pdf

[2] Bellec S., Godard E., 2002. *Contamination par les produits phytosanitaires organochlorés en Martinique : caractérisation de l'exposition des populations. Ministère de l'Emploi et de la Solidarité, Direction de la Santé et du Développement Social de la Martinique, 38 p.*

[3] Desprats, J. F., Comte, J.P. et Chabrier, C., 2004. *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de Phase 3. Rapport BRGM-CIRAD / RP-53262-FR, 25 pp.*

[4] Desprats, J. F., Comte, J.P. et Perian G., 2003. *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de Phase 2. Rapport BRGM-CIRAD / RP-52257-FR, 26 pp. plus cartes.*

[5] Achard R., Perrier X., Chabrier Ch., Lassoudière A. (2003) - *Cartographie du risque de pollution des sols de Martinique par les organochlorés. Rapport de Phase 1. BRGM/RP-52257-FR.*

et celle des sols devient donc plus nette lorsque l'on évalue la teneur des sols au contact immédiat de l'organe souterrain ; on peut en tirer les deux conclusions suivantes :

- La contamination des racines se fait essentiellement par diffusion au contact immédiat du sol.
- La distribution hétérogène de la chlordécone dans le sol est la cause principale de l'hétérogénéité de contamination des "racines".

CONCLUSION ET CONSÉQUENCES POUR LA GESTION DES IMPACTS DE CETTE POLLUTION

Détermination des niveaux de pollution à l'échelle de la parcelle

Malgré l'ancienneté des pollutions par la chlordécone, probablement du fait de l'épandage initialement localisé au pied des bananiers et d'effets complexes des travaux de sols réalisés par la suite, il a été observé une importante variabilité spatiale des teneurs du sol en chlordécone de l'horizon de surface. En l'absence d'érosion, les transferts de chlordécone au sein de la parcelle semblent faibles et ne provoquent pas l'apparition de gradient de pollution lié à la topographie.

Du fait de la possibilité d'une forte variabilité spatiale de la teneur du sol en chlordécone, il est recommandé, pour l'estimation de la teneur moyenne d'une parcelle sur un horizon, de procéder à un prélèvement d'au moins 20 points, avec une répartition homogène des points sur la parcelle.

Détermination des niveaux de contamination des cultures

Une forte variabilité intra parcelle de la réponse de la plante par rapport au niveau de pollution du sol à proximité a également été observée. La variabilité identifiée serait avant tout liée à la prédominance d'un transfert vers la plante de la chlordécone à partir du sol en proximité immédiate (à l'échelle centimétrique). Il en résulte une très forte variabilité intra parcelle de la contamination des plantes, correspondant au cumul de la variabilité de la réponse plante et de la variabilité spatiale de la teneur du sol.

Avec un échantillon composite issu de la collecte

de cinq plantes, le résultat peut s'écarter notablement de la valeur moyenne de contamination des plantes. Ce type d'échantillonnage généralement adopté pour l'analyse du produit avant commercialisation présente une bonne sensibilité, mais aussi une faible reproductibilité. Pour l'étude de la contamination des tubercules et l'établissement de référentiels de risque de contamination des tubercules, il est donc nécessaire de réaliser un échantillonnage de 20 plantes minimum.

PERSPECTIVES

Evaluation du transfert vers les végétaux

Les activités conduites au PRAM ont déjà permis d'acquérir les connaissances de base nécessaires à une évaluation des pollutions de la chlordécone à l'échelle de la parcelle et à une estimation de la variabilité de la pollution existante au sein d'une parcelle. Elles contribuent aussi à la réflexion sur la mise en place de dispositifs d'évaluation et de contrôle des contaminations des plantes par la chlordécone, les tubercules en particulier.

Les travaux repris ici font essentiellement état de la variabilité des contaminations des tubercules intra-parcelles, et dans une moindre mesure, de la variabilité de la réponse inter-parcelles pour un même type de sol. Des études complémentaires montrent qu'au sein d'un même type de sol, la variabilité entre parcelles de la réponse plante peut être non négligeable ; néanmoins, la teneur du sol constitue une variable clé d'évaluation du risque de contamination pour un type de sol donné [7].

Par ailleurs, un effet notoire du type de sol sur le transfert vers les plantes a été observé chez des producteurs comme en milieu contrôlé : le transfert de chlordécone vers la patate douce est plus important sur sols brun-rouille que sur andosols [6].

Ces études, encore très partielles, devront être complétées notamment sur les aspects suivants :

- les modalités de transfert de la chlordécone du sol vers les cultures de tubercules, en précisant l'incidence des différents types de sols, mais aussi des facteurs climatiques et techniques permettant de limiter la contamination des cultures,
- l'étude du rôle de la matière organique sur les

[6] Cabidoche Y.-M., Clermont-Dauphin C., Lafont A., Cattan P., Achard R., Caron A., Chabrier C., (2006) *Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture (APR 2002). Rapport final d'exécution, MEDD, 100 pp.*

[7] Achard R., Caron A., Nelson R., Perrier X., Dubois C., Duféal D. et Chabrier C., (2006). *Contamination des tubercules par le chlordécone sur sols pollués par cet organochloré en Martinique : Etude du transfert en parcelles de productions et approches expérimentales complémentaires ; rapport final d'exécution.*

modalités de stockage et de relargage de la chlordécone du sol vers les eaux et les végétaux (projet MOM IRD-Cirad),

- l'élargissement de l'état des lieux des contaminations à l'ensemble des cultures (et pas uniquement les racines et tubercules) par le SRPV,
- la conduite d'expérimentations pour évaluer

la sensibilité à la contamination par la chlordécone d'autres cultures, afin de pouvoir proposer des modalités de gestion des parcelles polluées ou des cultures alternatives en fonction du niveau de pollution,

- l'évaluation de l'impact de cette pollution à l'échelle des bassins versants sur les écosystèmes aquatiques et marins (projet MOM Cemagref-Cirad).